

Technical University of Denmark



Status for aktiv varmelagring i mindre bygninger

Duer, Karsten; Dalsgaard, Trine; Ellehauge, Klaus; Ladekarl, Palle

Publication date:
2001

Document Version
Også kaldet Forlagets PDF

[Link back to DTU Orbit](#)

Citation (APA):
Duer, K., Dalsgaard, T., Ellehauge, K., & Ladekarl, P. (2001). Status for aktiv varmelagring i mindre bygninger. (BYG Sagsrapport; Nr. SR 01-23).

DTU Library

Technical Information Center of Denmark

General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal

If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

Karsten Duer, SolenergiCenteret (Institut for Bygninger og Energi)
Trine Dalsgaard, SolenergiCenteret (Teknologisk Institut)
Klaus Ellehauge, SolenergiCenteret (Teknologisk Institut)
Palle Ladekarl, Aidt Miljø, Kongensbro, Aidt Mark, 8881 Thorsø

Status for aktiv varmelagring i mindre bygninger

Sagsrapport
BYG•DTU SR-01-23
2001
ISSN 1396-402x

STATUS FOR AKTIV VARMELAGRING I MINDRE BYGNINGER.

Dette materiale omhandler resultaterne af en undersøgelse gennemført under ledelse af Solenergicentret med henblik på at skabe et bedre overblik over teknikker og erfaringer indenfor emnet **lagring af solvarme i mindre bygninger**. Undersøgelsens resultater er baseret på oplysninger, der er tilgængelige i primært dansk litteratur. Resultaterne er opdelt i to hoveddele, hvor første del omhandler generelle aspekter vedrørende varmelagring og anden del omhandler fire forskellige konkrete teknikker til aktiv lagring af varme i bygninger. For hver af de konkrete teknikker indledes med et oversigtsskema efterfulgt af uddybende materiale. Der er store forskelle i den tilgængelige viden og erfaring om de forskellige teknikker og dette afspejler sig naturligvis i omfanget og arten af det uddybende materiale

INDHOLD:

GENERELT OM VARMELAGRING

- Hvad er varmelagring?
- Varmelagring i et materiale
- Aktiv og passiv varmelagring
- Lagerstørrelse og udformning
- Varmetab fra lagre
- Isolering af varmelagre
- Kuldebroer

FORSKELLIGE METODER TIL LAGRING AF VARME I MINDRE BYGNINGER

- Forskellige lagringsprincipper
- Aktiv varmelagring i vand
- Aktiv varmelagring i sand
- Aktiv varmelagring i sten
- Aktiv varmelagring i bygningskonstruktioner

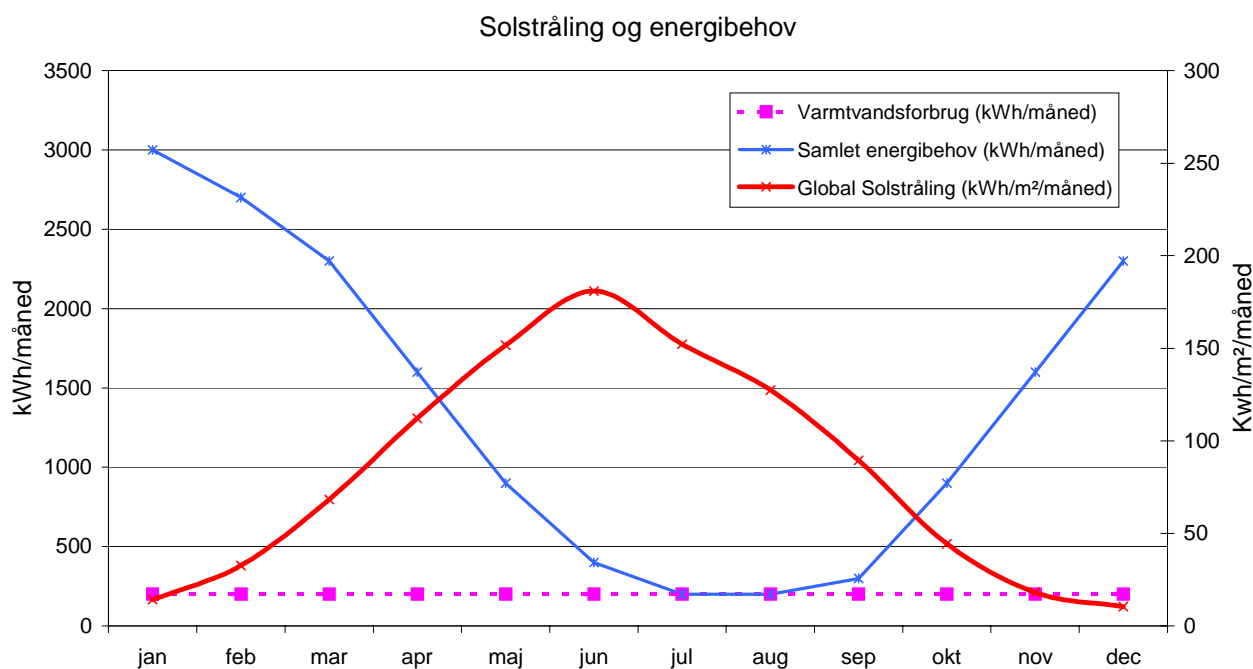
OM PROJEKTET

- Projektets formål
- Projektets finansiering
- Projektets deltagere

HVAD ER VARMELAGRING?

Varmelagring kan bredt defineres ved, at varme der produceres på ét tidspunkt, kan gemmes i et materiale og afgives på et andet tidspunkt. I bygninger forekommer der derfor altid en form for varmelagring, idet det tager tid for bygningsdelene at blive varmet op og kølet ned. Varmelagring kan også foregå i et særskilt lager i forbindelse med bygningen.

Hvis solenergi skal udnyttes til at dække en del af en bygnings opvarmningsbehov, er det nødvendigt at kunne lagre solvarmen minimum på dags- eller ugebasis. Det skyldes, at der normalt ikke er sammenfald mellem de tidspunkter, hvor der er meget sol, og tidspunkter med behov for opvarmning af bygningen. Dette forhold gælder både over døgnet og især over hele året. I figuren nedenfor er vist dels en bygnings energiforbrug (i alt ca. 16000 kWh/år) og det globale solindfald.



Globalt solindfald sammenlignet med en bygnings energibehov (samlet energibehov og varmtvandsforbrug). Kilder: Solstråling: DANVAK-bogen, Bygningens energibehov: Klaus Ellehauge

Varmelagring i et materiale

Energi i form af varme kan lagres i alle materialer, men der er stor forskel på, hvor meget varme der kan lagres i forskellige materialer. Energiindholdet i et varmelager afhænger af lagerets volumen, lagermaterialets varmekapacitet, samt af temperaturforskellen mellem lagerets opladede og afladede tilstand (temperaturspændet). Varmekapaciteten (betegnet c_p) for et materiale angiver, hvor meget energi der kan gemmes i et kg af materialet pr. grad materialet opvarmes.

I forbindelse med varmelagre er det ofte varmelagringskapaciteten pr. volumenenhed, der er interessant, fordi lagerets størrelse har betydning. Derfor skal et godt varmelagringsmateriale både have en høj varmekapacitet og en høj massefylde, så energiindholdet per m^3 lager kan blive så stort

som muligt. I tabellen nedenfor er listet massefylde og varmekapacitet for en række materialer, der er relevante i forbindelse med varmelagring i bygninger. Desuden er varmelagringskapaciteten pr. volumenenhed medtaget i tabellen.

Materialeverdier for udvalgte materialer, der kan anvendes til varmelagring

Kilde: Introduction to Heat Transfer, Incropera & de Witt, John Wiley and Sons, 2nd ed., 1990

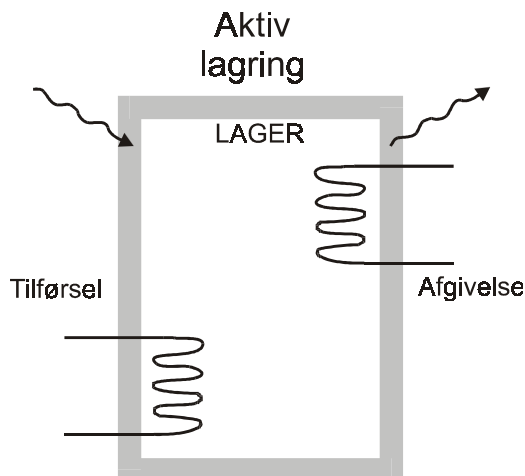
| Varmelagrings-medium | Densitet (massefylde) [kg/m ³] | Varmekapacitet [kJ/kg·K] | Varmelagringskapacitet pr. volumenenhed [kJ/m ³ ·K] | Varmelednings-evne [W/m·K] |
|----------------------|--|--------------------------|--|----------------------------|
| vand (20°C) | 1002 | 4,182 | 4190 | 0,60 |
| sand, tørt | 1515 | 0,800 | 1212 | 0,27 |
| sten (granit) | 2630 | 0,775 | 2038 | 2,79 |
| sten (sandsten) | 2150 | 0,745 | 1602 | 2,90 |
| ler, tørt | 1460 | 0,880 | 1285 | 1,3 |
| beton | 2300 | 0,880 | 2024 | 1,4 |
| træ | 400-550 | 2,300-2,800 | 1100-1300 | 0,10-0,17 |

Aktiv og passiv varmelagring

Varmetilførsel og varmeafgivelse fra et lager kan foregå **aktivt** eller **passivt**. Aktiv varmetilførsel eller afgivelse betyder, at varmen transporteres ind og ud af lageret med et varmetransporterende medie, f.eks. vand eller luft. Ved passiv varmetilførsel/afgivelse foregår varmetransporten uden brug af varmeoverførende medie, f.eks. ved varmeledning og stråling. Her betragtes et varmelagringsystem som aktivt, hvis blot en af processerne tilførsel eller afgivelse foregår aktivt. Det skal dog understreges, at der også i aktive lagringssystemer altid vil foregå passiv varmetransport til og fra et lager, fordi der typisk forekommer temperaturforskelle mellem lager og omgivelser.

Aktive varmelagre

Systemer med både aktiv varmetilførsel og aktiv varmeafgivelse er f.eks. vandlagre (beholdere), hvor varmen tilføres via én varmeveksler og fjernes via en anden. Varmelagre af sand, jord eller sten kan også operere med både aktiv tilførsel og afgivelse. Her transporteres varmen til og fra lageret ved hjælp af vand eller luft enten direkte eller ved hjælp af et rørsystem. I figuren nedenfor er vist en principskitse for et varmelager med både aktiv tilførsel og aktiv varmeafgivelse.

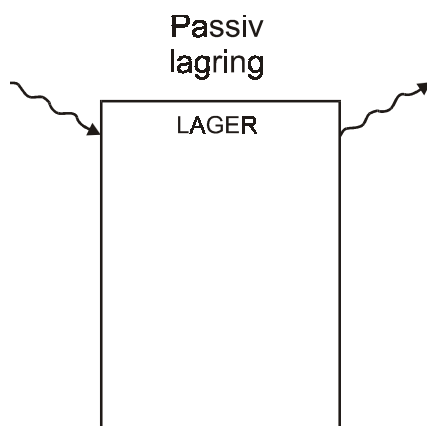


Principskitse for et varmelager med aktiv varmetilførsel og afgivelse.

Et gulvvarmesystem er et eksempel på varmelagring med aktiv tilførsel og passiv varmeafgivelse, idet varmen ledes aktivt ind i gulvkonstruktionen og afgives passivt ved varmeledning, konvektion og stråling. Lagringssystemer med passiv varmetilførsel og aktiv afgivelse kan f.eks. være ydre konstruktioner, der opvarmes passivt af solen og derefter afgiver varmen til gennemstrømmende luft.

Passive varmelagre

Ved den rene passive form for varmelagring udføres konstruktionerne i materialer med en stor varmekapacitet. Varme tilføres passivt f.eks. i form af solstråling og afgives også passivt ved varmeledning, konvektion og stråling. Konstruktionernes træghed medfører, at varmen oplagres på ét tidspunkt og afgives på et andet tidspunkt. Et eksempel på et system, der udnytter passiv varmelagring kan være en bygning, hvor solstråling gennem et vindue opvarmer en tung indvendig konstruktion, f.eks. et gulv. Gulvet optager varmen og afgiver denne igen, når rummets temperatur er lavere end gulvets, f.eks. om natten.



Principskitse for et varmelager med passiv varmetilførsel og afgivelse.

Passiv varmelagring vil ikke blive behandlet yderligere her.

Lagerstørrelse og udformning

Lagringskapacitet

Lagerets størrelse bestemmes bl.a. ud fra ønsker om, hvor meget energi der skal lagres og i hvor lang tid, samt af valget af lagermateriale. De forskellige lagertyper stiller forskellige krav til lagringstemperaturer, hvilket igen er væsentligt for lagerets størrelse. F.eks. kan varmelagring i en vandbeholder foregå ved et højere temperaturniveau (og derved udnytte et stort temperaturspænd) end i bygningsintegrerede lagre. Der skal derfor et større volumen i et bygningsintegreret lager til at lagre samme mængde energi.

Lagerets størrelse skal være i balance med det behov der er for at lagre energi. Simuleringer af vandlagre giver i langt de fleste tilfælde, at et lagervolumen på ca 50 –100 liter pr. m² solfanger giver den største ydelse. Der vil så være tale om korttidslagring af solvarmen inden for få dage eller uger.

Lagring af solvarmen i længere tid har kun mening for enfamilieanlæg hvis der etableres en solfanger der er stor nok til at kunne give en sommerproduktion der kan række hen i vinteren. For enfamiliehuse f.eks. mellem 30 og 100 m² solfanger. Der stilles dernæst uhyre store krav til lageret, idet voluminet skal være op mod 1-2 m³ pr. m² solfanger og idet isoleringsgraden skal være meget stor, svarende til mellem 50 og 100 cm isolering uden kuldebroer. Et sådant anlæg med f.eks. 50 m² solfanger og 100 m³ vandtankslager med 75 cm isolering omkring er naturligvis meget kostbart, men nok teknisk muligt.

Sæsonlagring ses derfor kun for store anlæg for mange (mere end 1000) huse, hvor dels anlægsudgifterne pr. m³ lager bliver væsentligt mindre og hvor endvidere isoleringsgraden kan være meget mindre da forholdet mellem overflade af lager (varmetab) og volumen (lagerkapacitet) er mindre for store lagre end for små.

Varmetab fra lagre

Det væsentligste problem ved lagring af varme over længere tid er, at en stor del af varmen tabes til omgivelserne på tidspunkter, hvor der ikke er behov for varmeafgivelse fra lageret. Dette skyldes, at varmen typisk lagres ved en højere temperatur end omgivelsernes for at kunne anvendes til f.eks. opvarmning af bygningen. Dette betyder generelt, at større dele af varmen vil gå tabt, hvis varmen ønskes lagret i længere tid.

Mens evnen til at lagre varme afhænger af lagringsmediet og af lagerets volumen, afhænger det uønskede varmetab af lagerets overfladeareal og isoleringsgraden. Dette betyder bl.a. at det er lettere at lagre varme i lang tid i et stort lager end i et lille lager, idet forholdet mellem overfladeareal og volumen er mindre ved store lagre. Langtidslagre så som sæsonlagre, hvor varme skal gemmes fra sommer til vinter, vil derfor primært kunne forekomme som fælleslagre for mange husstande.

Et varmelager til mindre bygninger, dvs. til en enkelt eller få husstande, vil være langt mindre, og deres overfladeareal relativt større i forhold til lagerets volumen. Lagring af varme i et mindre lager stiller derfor større krav til isoleringsevnen af overfladen, og en relativt større del af den oplagrede varme vil gå tabt. Det er derfor energioekonomisk bedst at udnytte varmen hurtigt, så tabet bliver mindst muligt.

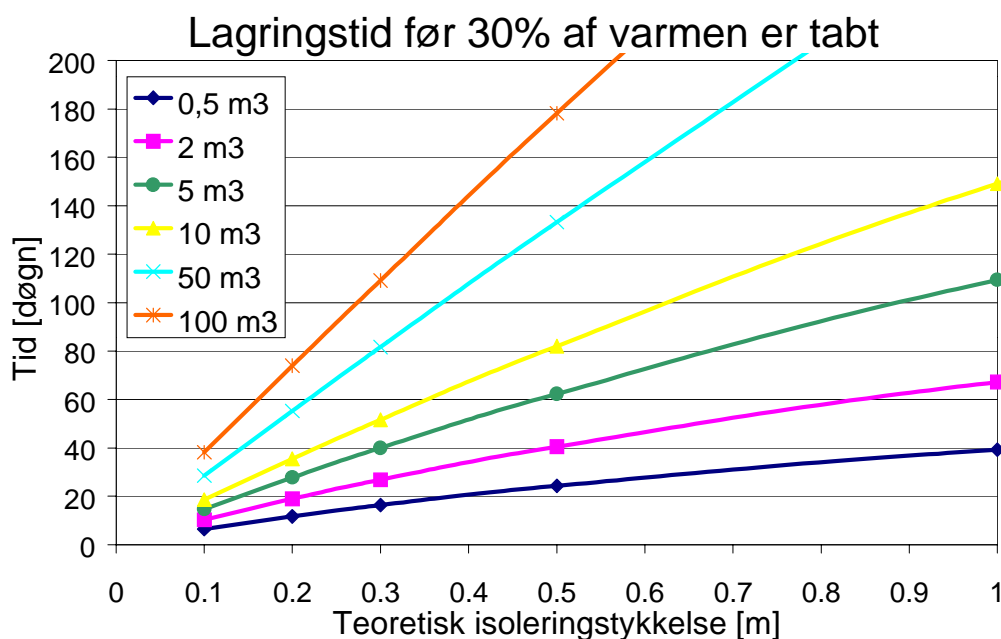
Varmelagre til mindre bygninger egner sig derfor bedst som korttidslagre, hvor den oplagrede varme udnyttes inden for en relativ kort tidsperiode efter oplagring. Dette er mest energiøkonomisk, idet varmen i så fald udnyttes, inden den går tabt. Korttidslagring kan f.eks. være lagring af varme fra dag til nat, eller lagring over perioder på dage til få uger. Disse lagre er mest effektive i forårs- og efterårsperioder, hvor der i dagtimerne kan være rigeligt med solstråling, mens der i nattetimerne er behov for opvarmning. Her kan der også være muligheder for at udnytte varme, der er lagret over flere dage.

Generelt skal lagre ikke udformes større end, at de lige netop kan indeholde den varmemængde der er behov for. Et større lager vil blot være dyrere og normalt give anledning til større varmetab, selvom temperaturniveauet vil være mindre.

Isolering af varmelagre

Reducering af det uønskede varmetab fra lageret er en meget væsentlig faktor for lagerets ydeevne. Dette betyder, at lagerets volumen i forhold til overflade skal være så stort som muligt, og overfladen skal være godt isoleret. Isoleringstykkelser afhænger af, hvor længe varmen skal lagres. Jo længere lagringstid, jo tykkere lag isolering er nødvendig. Dette medfører også, at lageret bliver dyrere.

I nedenstående figur er vist et eksempel på en sammenhæng mellem ønsket lagringstid og den nødvendige isoleringstykkelser for varmelagre af varierende størrelse. Det er et tænkt eksempel med et ideelt vandlager uden kuldebroer, med ensartet isolering mm. I eksemplet opvarmes vandet fra 30°C til 90°C, så hele lagervolumenet er opvarmet. I lagringsperioden bliver der ikke aktivt tilført eller fjernet varme. Det er i eksemplet valgt at der maksimalt accepteres et tab på 30% af den oplagrede energi.



Sammenhæng mellem isoleringstykkelser og mulig lagringstid for et ideelt vandlager.

Med de isoleringstykkelser, der normalt anvendes til varmtvandsbeholdere, dvs. ca. 10-20 cm kan det af figuren ses, at ikke er muligt at gemme varme i mere end op til en måned, med mindre lageret bliver meget stort. Da de viste beregninger er ideelle beregninger, hvor der bl.a. ikke findes kuldebroer, vil der realiteten skulle meget større isoleringstykkelser til, for at gemme samme mængde varme.

For andre lagertyper, f.eks. sand eller betonlagre, gælder de samme forhold. Lagring af varme over længere perioder stiller meget store krav til isoleringstykkelsen for lageret. Kravene til isoleringstykkelse bliver større, jo mindre lageret er, hvilket skyldes, at forholdet mellem overfladeareal og lagervolumen bliver større.

Under materialet for vandlagre er angivet sammenhæng mellem anlægsydelse og dækningsgrad som funktion af forskellige kombinationer af solfangerareal og lagerstørrelse.

Kuldebroer

Kuldebroer kan føre til store varmetab fra lageret, selvom det ellers er godt isoleret. Kuldebroer kan f.eks. være rørføringer, der gennembryder isoleringen. Bygningsintegrerede varmelagre kan desuden have konstruktionsbetingede kuldebroer f.eks. hvor den pågældende bygningsdel støder op til øvrige bygningsdele.

Varmetabet gennem kuldebroer kan sagtens være større end varmetabet gennem isoleringen. Derfor må kuldebroerne nøje vurderes og så vidt muligt undgås. Uundgåelige kuldebroer såsom rørtilslutninger og understøtninger bør altid anbringes ved lagerets koldeste sted.

FORSKELLIGE LAGRINGSPRINCIPPER

Forskellige koncepter for aktiv varmelagring er her inddelt i kategorier på trods af, at der kan være typer, der overlapper denne kategorisering. Der er beskrevet varmelagre indenfor nedenstående kategorier:

- vandlagre
- sandlagre
- stenlagre
- bygningskonstruktioner

De forskellige typer af varmelagre er alle betragtet som lagre i mindre bygninger, hvilket vil sige, at de skal være designet til lagring af varme til en enkelt eller evt. få husstandes varmebehov. Der er også lagt vægt på, at lagertyperne både energimæssigt og økonomisk er bedst egnede til korttidslagring.

Til karakterisering af de forskellige lagerkoncepter er der lagt vægt på følgende punkter:

- lagringsprincip, lagerets virkemåde
- anlægsudformning eksemplificeret med skitser
- karakteristiske egenskaber ved lagertypen
- tidshorisont for lagring
- mulighed for styring af varmetilførsel og afgivelse
- komfort
- anlægsydelse og dækningsgrad
- hidtidige erfaringer
- referencer og litteratur

Af andre punkter, der kan være af betydning for vurdering af en varmelagringsmetode, men som ikke er medtaget her, kan nævnes:

- Risiko for fugtproblemer i lageret eller i bygningen (fugt kan trænge ind i bygningen eller i bygningskonstruktionerne).
- Stabilitets- eller styrkemæssige forhold, hvor lageret kan påvirke bygningen (f.eks. hvis lageret er pladeret under bygningen).
- Forbrug af miljøskadelige eller sundhedsskadelige stoffer f.eks. i forbindelse med de kemiske lagre.

AKTIV VARMELAGRING I VAND

| <i>Oversigt Lagring i Vand</i> | | <i>Bemærkning</i> | <i>Se mere</i> |
|--------------------------------|-----------------------------------|------------------------|----------------|
| <i>Varmebærer</i> | Vand | - | |
| <i>Varmedfylde, lager</i> | 4,2 MJ/m ³ K | - | Side 12 |
| <i>Temperaturspænd</i> | 30-95°C | Lagdeling i tank mulig | Side 12 |
| <i>Op-/Afladning</i> | Aktiv/aktiv | - | Side 9 |
| <i>Lagervolumen</i> | 50-100 l/m ² solfanger | Økonomisk optimeret | Side 10 |
| <i>Lagringsperiode</i> | Døgn – uger | - | Side 10 |
| <i>Dækningsgrader</i> | 20-30% | Økonomisk optimeret | Side 12 |
| <i>Erfaringer</i> | Gode | Udbredt | Side 14 |
| <i>Integrationsvenlig?</i> | Nej | Beholder | |
| <i>Andet</i> | - | - | |

Lagringsprincip, vand

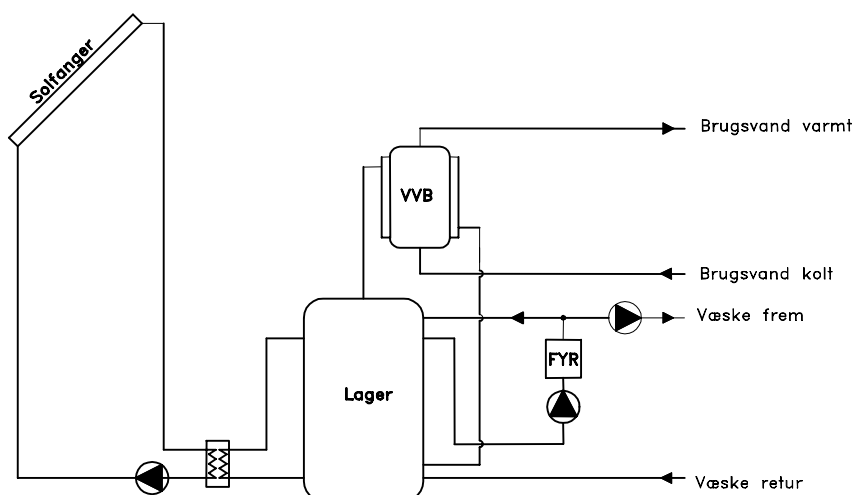
Fra solfangeren ledes varmen ind i et lager i form af en vandbeholder/tank typisk ved hjælp af en varmeveksler. Varmen hentes aktivt ud af lageret, når der er behov for varmen. Både varmetilførsel og varmeafgivelse sker dermed aktivt. I denne forbindelse betragtes kun vandlagre, der er så små, at de kan anvendes i forbindelse med rumopvarmning til 1-familie boliger, i modsætning til store sæsonlagre, der typisk skal dække mange husstandes varmebehov.

Eksempler på anvendelse, vand

Lagring i varmtvandsbeholdere til dækning af rumvarmebehov.

Eksempel på anlægsopbygning, vand

I nedenstående figur er vist et eksempel på en anlægsopbygning. Generelt bør anlægget udføres så enkelt som muligt, så der er mindst mulig risiko for fejlinstallationer eller fejlstyring.



Eksempel på solvarmeanlæg med vandbeholder som varmelager

Ydermere bør anlægget udføres med færrest mulige varmevekslere, idet der ved hver varmeveksling er tab, der medfører dårligere ydelse.

Tidshorisont for varmelagring i vand

Tidshorisonten for varmelagring i vand afhænger fuldstændig af lagertankens udformning og især af isoleringstykkelsen. Varmelagring i en vandlagre i lange perioder, f.eks. sæsonlagre, er teknisk set muligt, men lagring i kortere perioder er mest rentabelt med den nuværende teknologi.

Lagerstørrelse, vand

Som hovedregel vil et lagervolumen på ca 50 –100 liter vand pr. m² solfanger give det bedste pris/ydelses forhold. Dette gælder uanset om solfangerarealet er stort eller lille i forhold til forbruget.

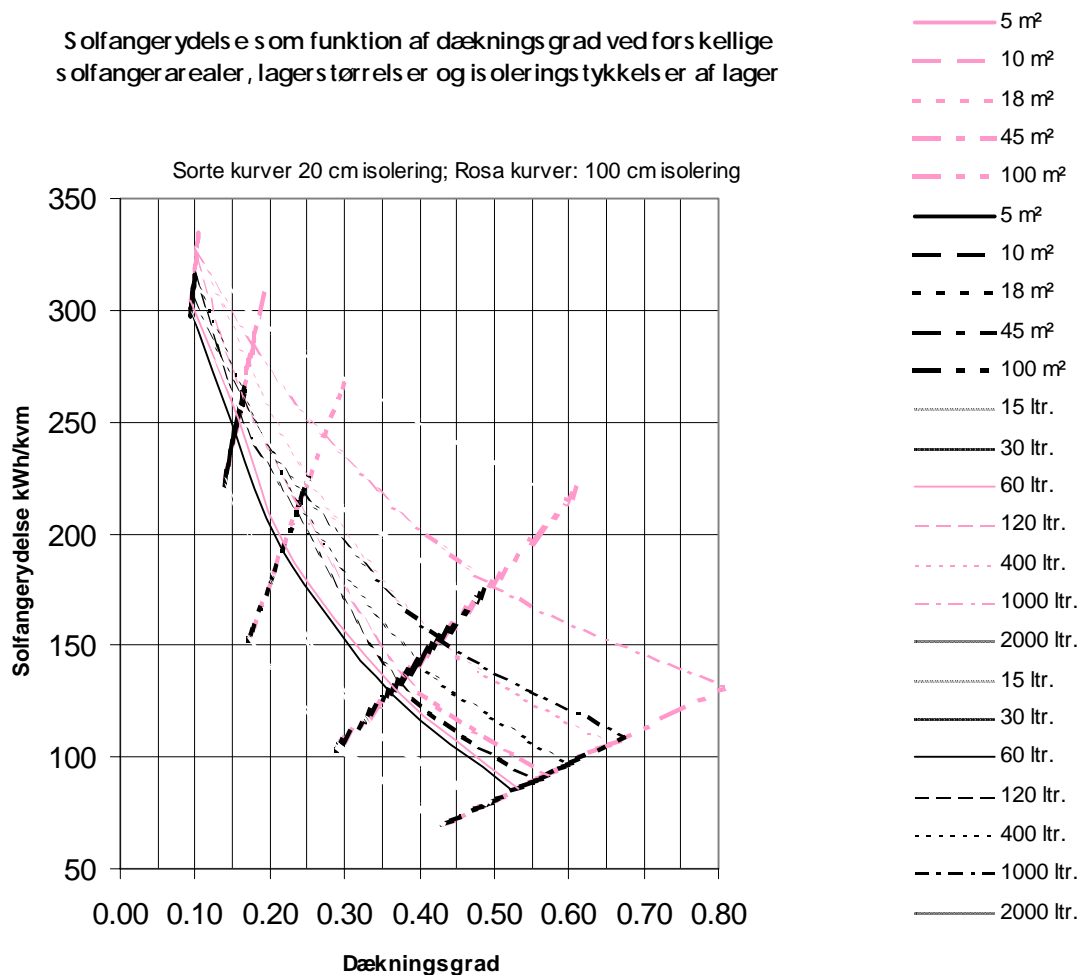
Større lagre, der kan gemme solvarmen i længere tid, har kun mening hvis der etableres en solfanger, der er stor nok til at kunne give en sommerproduktion, der kan række hen i vinteren. For enfamiliehuse f.eks. mellem 30 og 100 m² solfanger. Der stilles dernæst uhyre store krav til lageret, idet voluminet skal være op mod 1-2 m³ pr. m² solfanger og idet isoleringsgraden skal være meget stor svarende til mellem 50 og 100 cm isolering uden kuldebroer. Et sådant anlæg med f.eks. 50 m² solfanger og 100 m³ vandtankslager med 75 cm isolering omkring er naturligvis meget kostbart, men nok teknisk muligt.

For mindre solfangerarealer i forhold til forbruget vil som hovedregel et større lager end 50 –100 liter pr. m² solfanger blot give anledning til større varmetab og samtidigt være mere kostbart.

På nedenstående figur er vist sammenhængen mellem solfangerareal og lagerstørrelse for et solvarmeanlæg til brugsvands- og rumopvarmning ved et hus med et årligt energiforbrug til rumvarme og varmt vand på i alt 17.700 kWh.

Simuleringsresultaterne er for isoleringstykkelserne 20 cm (sorte kurver) og 100 cm (rosa kurver) indtegnet på figuren. Figuren kan med en vis forsigtighed anvendes til at skønne hoveddimensioner for et anlæg til et givet (ikke lavenergi) enfamiliehus.

Figuren er lidt vanskelig at aflæse – til hjælp kan oplyses, at de rette linier, med ”stigende tendens” repræsenterer solfangerkurverne udregnet for beholdere med hhv. 20 cm isolering (sorte kurver) og



for beholdere med 100 cm isolering (rosa kurver). De krumme kurver med ”faldende tendens” repræsenterer beholderkurverne for hhv. 20 cm isolering (sorte) og 100 cm isolering (rosa). Med udgangspunkt i f.eks. ønsket dækningsgrad på 30% på den vandrette akse, kan ønsket opfyldes af alle de kombinationer af solfangerareal, beholdervolumen og isoleringsgrad, der resulterer i kurver der skærer lodret over 0.30. Det giver kombinationsmuligheder fra 18 m² solfanger med 2000 l/m² lager (i alt 50 m³ lager) med 100 cm isolering til 45 m² solfanger med 15 l/m² lager (i alt 675 l lager) med 20 cm isolering.

Eksempelvis ønskes et solvarmeanlæg, som skal dække 30% af energiforbruget i et hus med et årligt behov på 20.000 kWh. Det kan af figuren aflæses, at en kombination af et solfangerareal ca. midt mellem 18 og 45 m², dvs. ca. 32 m², samt et lager på 120 liter pr m² dvs. i alt 3.8 m³ vil kunne give 30 % dækning i referencehuset. Solfangerydelsen vil være på ca. 170 kWh/m², og der tages udgangspunkt i de sorte kurver gældende for lagre med 20 cm isolering. For det aktuelle hus vil solfangeren skulle dække 30% af 20.000 kWh = 6.000 kWh og solfangerarealet skal således være 6000kWh/170 kWh/m² = 35 m² medens lagerstørrelsen skal være 35 * 120 = 4200 liter.

Et solfangerareal på ca. 25 m² med et lager på 2000 liter pr m² dvs. 50 m³ skønnes også at kunne give 30%, men vil uden tvivl være langt dyrere at opføre.

Karakteristiske egenskaber ved denne lagringsmetode

Vand har en meget høj varmekapacitet på ca. 4,2 MJ/kgK, hvilket er en af de væsentligste egenskaber i forbindelse med varmelagring. Der kan derfor lagres meget varme i et forholdsvis lille lagervolumen. Desuden har vand en god varmeoverføringsevne, hvilket betyder, at der kan udføres effektive varmevekslere til lageret. I et vandbaseret lager kan varmen gemmes ved forholdsvis høje temperaturer, dvs. op til ca. 90°C. Det giver et temperaturspænd på 60 K fra 90°C til ca. 30°C i afladet tilstand. Dette betyder, at der kan lagres store mængder energi i lageret.

Da et vandlager oftest ikke er i direkte kontakt med bygningens indeklima, er der mulighed for at tilføre varme til lageret, selvom der ikke umiddelbart er et rumvarmebehov.

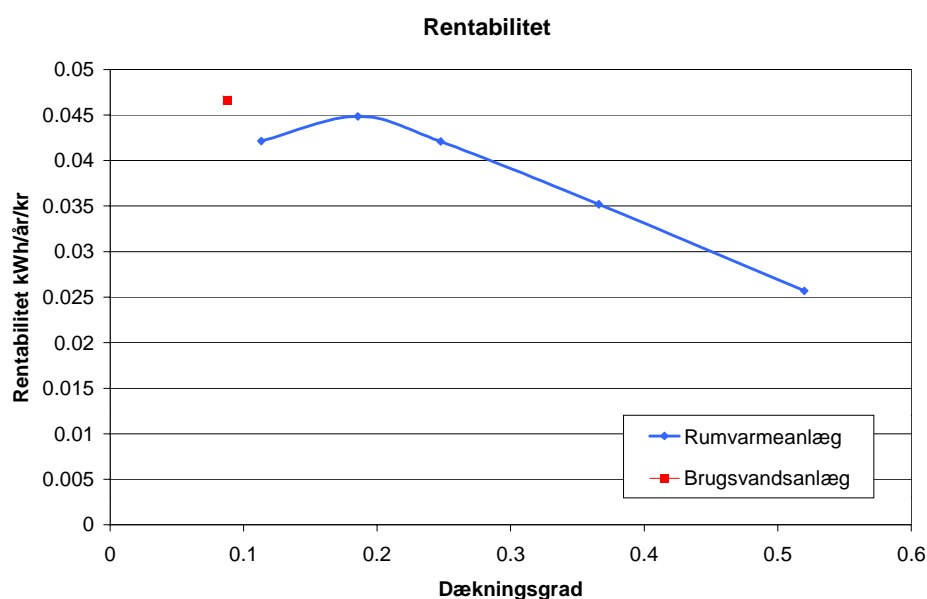
Ved rigtig udformning af lagertanken kan der opnås temperaturlagdeling, hvorved det varme vand ikke i væsentlig grad bliver opblandet med koldt vand. Temperaturlagdeling opstår, fordi koldt vand har en større massefylde end varmt vand. Det varme vand vil derfor flyde oven på det kolde. Temperaturlagdelingen betyder, at et solvarmeanlæg kan operere med lave indløbstemperaturer, hvilket giver størst mulig ydelse fra solfangerne. Desuden kan selv mindre mængder oplagret varme udnyttes effektivt. Da det varme vand ligger øverst i lageret er der derfor også vigtigt at undgå kuldebroer f.eks. i form af rørgennemføringer her.

Varmelagring i vand har desuden de fordele, at vand er et billigt og ufarligt materiale, samt at lagerbeholdere kan udføres som forholdsvis standardvarer. Til gengæld er metoden måske ikke direkte egnet til selv-byg.

Anlægsydelse/dækningsgrad

Anlægsydelse samt årlig dækningsgrad afhænger af solfangerareal og beholderdesign, men under normale forudsætninger er det vurderet, at mindre anlæg med en dækningsgrad på ca. 15-20%, økonomiske set er at foretrække, idet ydelsen pr. m² solfanger er bedst for små anlæg.

Kurven nedenfor viser et eksempel, hvor rentabiliteten opgjort som antal kWh/år pr investeret krone er optegnet som funktion af anlæggets dækningsgrad. Til sammenligning er også rentabiliteten for et normalt brugsvandsanlæg vist. Kurven viser et eksempel, og forløbet kan variere alt efter anlæggets udformning og størrelse. Den generelle tendens er dog, at den bedste rentabilitet opnås ved en forholdsvis lav dækningsgrad.



Rentabilitet for et rumvarmeanlæg som funktion af anlæggets dækningsgrad sammenlignet med et brugsvandsanlæg. Kilde: Klaus Ellehauge

Økonomi

Anlæggenes økonomi er bedst, når der er et rumvarmebehov i overgangsperioderne forår og efterår, samt eventuelt om sommeren. Dette rumvarmebehov kan f.eks. være i form af gulvvarme. Det er vurderet, at et rumvarmeanlæg med varmelagring i vand kan udføres med samme rentabilitet som et rent brugsvandsanlæg.

Styring

Både varmetilførslen og varmeafgivelsen kan styres ved regulering af flowene i kredsene. Styring af anlægget er bestemt af temperaturer i indeklimaet og forskellige steder i systemet. Der er dermed gode muligheder for at styre lageret og sikre optimal drift. Ved hjælp af termostatventiler er der mulighed for brugerstyring af varmeafgivelsen til indeklimaet..

Ved styring af varmelageret kan der indarbejdes en prioritering, så varmt brugsvand vægtes højere end rumvarme. Dette er ofte hensigtsmæssigt, fordi der i alle perioder er behov for brugsvand, mens der ikke altid er behov for rumvarme. Hvis der er behov for varmt brugsvand, kan det ikke betale sig at gemme varmen til rumvarme på et senere tidspunkt pga. de tab, der altid vil være i lageret.

Komfort

Den lagrede varme i vandbeholderen påvirker ikke direkte indeklimaet, da lageret typisk er placeret udenfor opholdszonen. Varmen tages kun fra lageret, når der er brug for den, hvilket giver gode muligheder for at regulere det termiske indeklima og dermed opretholde et højt komfortniveau.

Hidtidige erfaringer med konceptet

De første anlæg har generelt været fejldimensionerede, idet solfangerareal, beholderstørrelse og beholderens isoleringstykkelse ikke har passeret sammen. Typisk er, at solfangerarealet har været for stort i forhold til det aktuelle forbrug, hvilket har betydet, at solfangerne ikke har kunne yde det optimale. Derudover har lageret været behæftet med kuldebroer, hvilket har resulteret i et for stort varmetab fra dette.

De tidligere anlæg har desuden været komplicerede anlæg, hvor der har været problemer med fejlinstallationer og mangel på korrekt styring.

Der har ikke været problemer med det termiske indeklima i forbindelse med denne form for varmelagring.

Referencer omhandlende varmelagring i vand med kort indholdsbeskrivelse

- /1/ Notat vedrørende lagring af solvarme til rumvarme
Klaus Ellehauge
Solenergi Center Danmark, DTI Energi, 1997

Notatet beskriver beregninger på anlægsydelse, dækningsgrad og rentabilitet for solvarmeanlæg til kombineret rum- og brugsvandsopvarmning. Det er vurderet, at mindre anlæg med dækningsgrader på omkring 20% har den bedste rentabilitet, samt at disse anlæg kan udføres med lige så god økonomi som rene brugsvandsanlæg.

- /2/ Målinger på solvarmeanlæg til kombineret brugsvands- og rumopvarmning
5 markedsførte solvarmeanlæg installeret hos anlægsejerne
Klaus Ellehauge
Laboratoriet for Varmeisolering, DTU, 1993

Rapporten beskriver målinger foretaget på 5 solvarmeanlæg til kombineret rum- og brugsvandsopvarmning. De målte nettoydelse var højere end beregnet og lå mellem 110 og 360 kWh/m² solfanger. Økonomien for anlæggene var forholdsvis god, idet der var et rumvarmebehov i sommerperioden. Der var desuden opnået en god termisk komfort i forbindelse med anlæggene.

- /3/ Solvarmeanlæg til kombineret brugsvands- og rumopvarmning
Udvikling af konkurrencedygtige anlæg
Klaus Ellehauge, Laboratoriet for Varmeisolering, DTU, 1991

Rapporten indeholder en opsamling af de væsentligste erfaringer opnået indtil 1991. Derudover foretages beregninger af anlægsydelse og økonomi for forskellige anlægstyper, hvoraf nogle er nye typer. Beregningerne viser, at der kan opnås gode anlægsydelse og en økonomi, der svarer til rene

brugsvandsanlæg for især små anlæg. Et system med drain-back anlæg er afprøvet på DTU og vurderes som værende det anlæg med bedst anlægssydelse og økonomi.

- /4/ Et solvarmeanlæg til rumopvarmning og varmt brugsvand
Målinger på systemprøvestand
Ole Balslev-Olesen og Nick Bjørn Andersen
Laboratoriet for Varmeisolering, DTU, 1984

Rapporten beskriver dimensionering og målinger på et kombineret solvarmeanlæg til rumvarme og brugsvand. Målingerne blev foretaget på en prøvestand på DTU. Lageret er særligt konstrueret med henblik på en god temperaturlagdeling. Kobling til et eksisterende varmeanlæg er beskrevet, bl.a. ved anvendelse af en separat solvarmeradiator. Dækningsgraden for anlægget er beregnet til ca. 25% uden hensyntagen til sparet tomgangstab.

- /5/ Solvarmeanlæg til rumopvarmning
En udredning baseret på 2 års målinger på anlæg i Greve og Gentofte
Svend Erik Mikkelsen og Leif Sønderskov Jørgensen
Laboratoriet for Varmeisolering, DTU, 1981

Anlæggene i denne rapport er 2 af de første demonstrationsanlæg i Energiministeriets solvarme-program. Der blev målt på anlæggene i 2 år. Anlæggene var på hhv. 50 m² og 28 m², og dækningsgraderne lå på hhv. 28% og 14%. Begge anlæg var overdimensionerede i forhold til lagerstørrelse og forbrug og et nyt systemkoncept blev foreslået som konklusion på projektet.

- /6/ Solvarmeanlæg til rumopvarmning og varmt brugsvand
Demonstrationsanlægget i Ejby
Energiministeriets varmelagerprojekt, rapport nr. 41
Nick Bjørn Andersen
Laboratoriet for Varmeisolering, DTU, 19xx

Solvarmeanlægget i Ejby var et demonstrationsanlæg, der efterfulgte de to anlæg i ovenstående reference /5/. Dette anlæg var på 17,3 m² solfanger og 735 liter lagertank. Anlægget blev udført som et drain-back system med en separat solvarmeradiator. Der blev målt på anlægget i ét år. Anlægssydelsen var lille (152 kWh/m²) og dækningsgraden ca. 25%. Erfaringer fra dette projekt var, at også dette anlæg var overdimensioneret, samt at der var styringsproblemer i forbindelse med drain-back systemet.

AKTIV VARMELAGRING I SAND

| <i>Oversigt Lagring i Sand</i> | | <i>Bemærkning</i> | <i>Se mere</i> |
|--------------------------------|---|-------------------------------------|----------------|
| Varmebærer | Vand | - | Side 16 |
| Varmedfylde, lager | 1,2-1,4 MJ/m ³ K | ~1/3 af vands varmedfylde | Side 17 |
| Temperaturspænd | 20-50°C | - | Side 17 |
| Op-/Afladning | Aktiv/Passiv – svagt aktiv | Enkel virkemåde v. passiv afladning | Side 16 |
| Lagervolumen | 0,5 – 1m ³ /m ² solfanger | - | Side 17 |
| Lagringsperiode | Døgn – uger | - | Side 17 |
| Dækningsgrader | 20-30% | Økonomisk optimeret | Side 18 |
| Erfaringer | Gode | - | Side 20 |
| Integrationsvenlig? | Ja | - | Side 18 |
| Andet | Komfort | Overtemp. sommer kan forekomme | Side 20 |

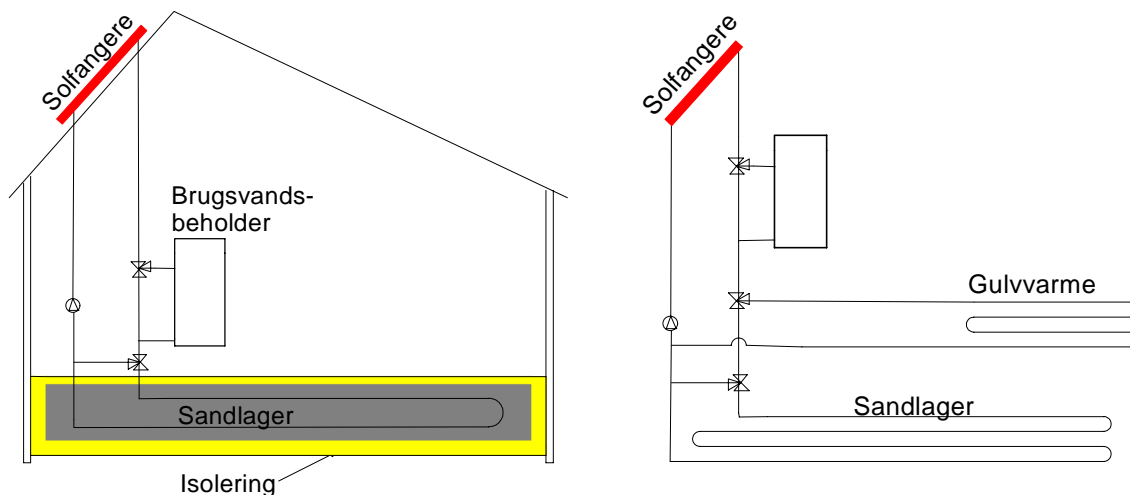
Lagringsprincip

Væskebåren varme lagres i et velisoleret komprimeret sand- eller jordvolumen placeret under bygningens terrændæk. Varmen overføres aktivt fra væske til lager via slanger eller rør, der således fungerer som varmevekslere. Varmen afgives hovedsageligt passivt fra lageret til bygningen samt som tab til de øvrige omgivelser. Ud over at virke som aktivt/passivt lager, der tilfører bygningen varme, reducerer lageret transmissionstab mod jord. Ved at føre en koldtvandsledning gennem sandlageret kan lageret endvidere medvirke til forvarmning af varmt brugsvand. Generelt kan velisolerede bygningers opvarmningsbehov gøres beskedent når solen skinner da en fornuftig passiv udnyttelse af solen giver et betydeligt energitilskud. Det betyder, at en effektiv passiv udnyttelse af solen til en vis grad overflødig gør en direkte anvendelse af aktiv solvarme til rumopvarmning når solen skinner, men stadig giver rum for lagret solvarme. Hvis passiv udnyttelse af solenergi ikke skønnes at give tilstrækkelig direkte udnyttelse af solen til at dække opvarmningsbehovet når solen skinner er en direkte udnyttelse af aktiv solvarme relevant. I forbindelse med et sandlager kan aktiv solvarme udnyttes direkte via en gulvvarmekreds, der pga. gulvets termiske træghed også vil virke som et korttidslager.

Eksempel på anlægsopbygning

I nedenstående figur er vist et eksempel på en bygning forsynet med et solvarmeanlæg med varmelagring i et sandlager. Udover sandlageret er anlægget forsynet med en varmtvandsbeholder til

varmt brugsvand. Sandlageret er kraftigt isoleret på sider og bund og mindre isoleret på toppen mod bygningen. Anlægget vist til højre er forsynet med en gulvvarmekreds.



Eksempler på solvarmeanlæg med sandlager

Tidshorisont for varmelagring

Lagingsperioden afhænger af lagerets isoleringsgrad og udformning. Lange lagringstider (måneder) kan opnås ved meget kraftig isolering af lageret, men da den enkle passive afladning af lageret derved forhindres/hæmmes er lageret mere velegnet til lagring over kortere tid (dage/uger). Lagerets primære funktionsperioder er i overgangsperioderne forår og efterår.

Lagerdesign

Der er ikke foretaget præcise undersøgelser af den optimale udformning og størrelse af et sandlager. Der er dog gennemført beregningseksempler, der tyder på, at et sandlager med en udstrækning svarende til hele det bebyggede areal og i en tykkelse på ca. 20-30 cm har tilstrækkelig varmekapacitet. For et 115 m² velisoleret enfamiliehus er lagerkapaciteten beregningsmæssigt varieret svarende til en sandtykkelse på mellem 0,75 m og 0,2 m. For hvert undersøgt lagervolumen blev solfangerarealet varieret mellem 10 og 30 m². Der blev ikke fundet nævneværdig reduktion i ydelsen for det lille lager i forhold til det store uanset det anvendte solfangerareal. For et solfangerareal på 20 m² svarer et 25 cm tykt lager til ca 0,7 m³ sand pr. m² solfanger. Mere detaljerede undersøgelser af solvarmeanlæg med vandbaserede lagre har peget på et lager på ca 50-100 l/m² solfanger altså ca 1/10 af sandlager-eksemplet. Imidlertid er sands varmekapacitet ca 1/3 af vands, temperaturspændet for et sandlager er højst 2/3 af et vandlagers og tages der endvidere højde for den vanskeligere varmeoverføring til/fra sandlageret samt sandlagerets større varmetab synes forholdet 0,7 m³/m² af den rigtige størrelsesorden. Man skal være opmærksom på, at for et givent solfangerareal vil et lille lager opnå højere temperaturer om sommeren end et stor lager og dette kan medføre øget varmetilførsel fra lager til bygningen i sommerperioden og dermed øgede overtemperaturproblemer.

Lagerets bund og sider isoleres med 100-200 mm isolering. Af hensyn til lagerets passive afladning anvendes mindre isoleringstykkelse (50-100 mm) på toppen af lageret.

Ved direkte udnyttelse af den aktive solvarme kan lageret fra et energimæssigt synspunkt med fordel deles op, så en del af lagerkapaciteten ligger i et isoleret lager under gulvet og en del ligger i en gulvvarmekreds hvor solvarmen kan udnyttes direkte, når der er samtidigt varmebehov og sol. Beregninger af lagerydelse ved varierende rørafstande viser, at ydelsen ikke er videre følsom overfor variationer af rørafstand indenfor intervallet 15 – 60 cm. Der er stort set ingen ydelsesreduktion ved at øge rørafstanden fra 15 til 30 cm, medens der er beregnet et mindre fald ved at øge afstanden til 60 cm. En rørafstand mellem 30 og 60 cm forventes således at være et økonomisk og termisk fornuftigt valg. Rørene skal være fremstillet af materiale, der kan holde til høje temperaturer og et vist tryk. Der er gode erfaringer med 16 mm ribberør af polypropylen. PEX-rør kan også anvendes.

Karakteristiske egenskaber ved denne lagringsmetode

Som nævnt ovenfor skal et sandlagers volumen være i størrelsesordenen 10 gange større end et vandlagers for at opnå samme ydelse. Til gengæld er sandlageret velegnet til integration i bygninger og pga. lagerets simple virkemåde forventes lageret at være driftsikkert og uden store vedligeholdelsesproblemer. Lageret kan anvendes ved såvel nybyggeri som ved renoveringsopgaver, hvor et eksisterende gulv alligevel skal opgraves og isoleres og den enkle teknik muliggør selv- eller medbyg.

Anlægsydelse/dækningsgrad

Ydelse og dækningsgrad afhænger i høj grad af solfangerareal og solfangereffektivitet, lagerudformning samt bygningens varmebehov. Et stort varmebehov kan give en relativ høj ydelse, men en lav dækningsgrad. For to bygninger med samlet energiforbrug til rumvarme og varmt brugsvand på hhv. ca. 9800 kWh/år og ca 14000 kWh/år er solvarmeanlæggets ydelse beregnet for varierende solfangerareal og for to forskellige typer solfangere:

1. En solfanger med plastabsorber og dobbelt dæklag ($\eta_0=0.68$, $k_0=5.7$, $k_1=0.012$) og
2. En solfanger med selektiv absorber og dobbelt dæklag ($\eta_0=0.77$, $k_0=4.4$, $k_1=0$).

Lagerets varmekapacitet er holdt konstant svarende til en lagertykkelse på ca 25 cm. De beregnede ydelser er vist i nedenstående tabeller. Ydelserne inkluderer bidrag til rumopvarmning, brugsvandsopvarmning samt reduktion af transmissionstab til underliggende jord.

Eksempel på beregnede anlægsydelser.

Eksempel på beregnede anlægsydelser.

Opvarmnings- og brugsvandsbehov ca 9800 kWh/år

| Solfangerareal | Ydelse, type 1 | Ydelse, type 2 |
|-------------------|----------------|----------------|
| 10 m ² | 2300 | 2800 |
| 20 m ² | 3000 | 3700 |
| 30 m ² | 3400 | 4200 |
| | [kWh/år] | [kWh/år] |

Eksempel på beregnede anlægsydelse.

Opvarmnings- og brugsvandsbehov ca 14000 kWh/år

| Solfangerareal | Ydelse, type 1 | Ydelse, type 2 |
|-------------------|----------------|----------------|
| 10 m ² | 3000 | 3700 |
| 20 m ² | 4100 | 5100 |
| 30 m ² | 4800 | 5900 |
| | [kWh/år] | [kWh/år] |

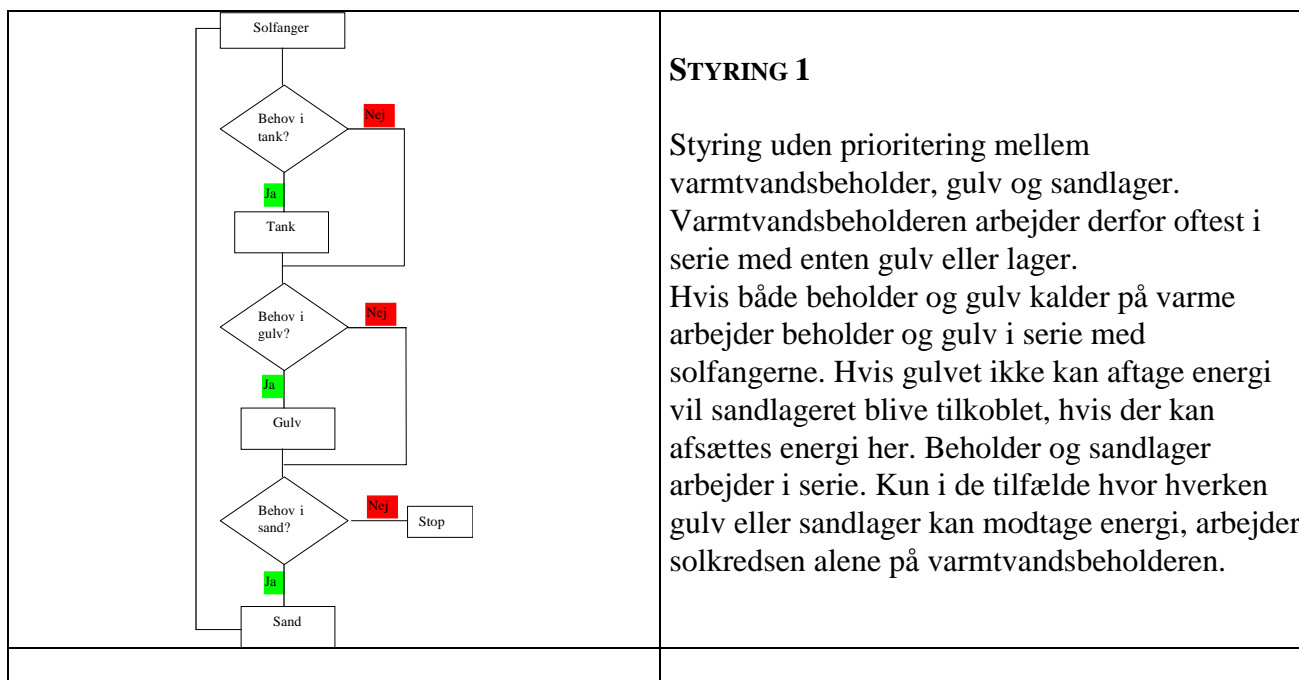
Det skal understreges, at ovenstående er eksempler baseret på beregninger. Der er ikke foretaget målinger, der nøjagtigt fastsætter ydelsen af solvarmeanlæg med sandlager.

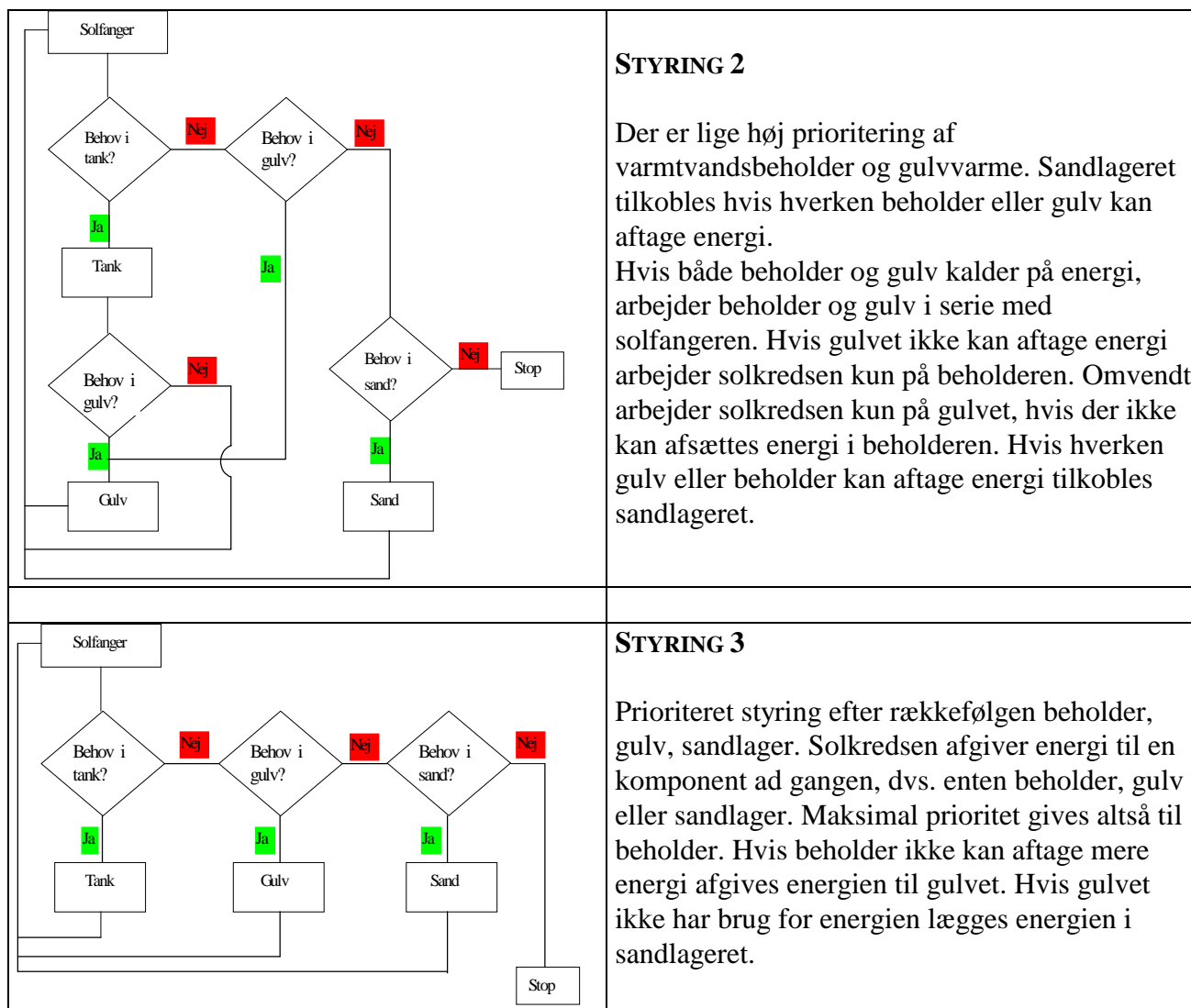
Økonomi

Som for andre typer rumvarmeanlæg med varmelagre er økonomien bedst hvis der er et rumvarmebehov i overgangsperioderne og evt. i sommerperioden. De teoretiske analyser, der ovenfor er refereret til har på beregningsmæssigt niveau sandsynliggjort, at energiprisen for et solvarmeanlæg med sandlager ligger på niveau med energiprisen for mere konventionelle rene brugsvandsanlæg – investeringen er større, men ydelsen forventes tilsvarende større.

Styring

Generelt bør styringen indrettes, så den producerede varme afsættes, hvor der hurtigst er varmebehov – en lagring betyder altid tab. Der er teoretisk undersøgt tre styringsstrategier for et anlæg med sandlager og gulvvarmekreds (se figuren nedenfor).



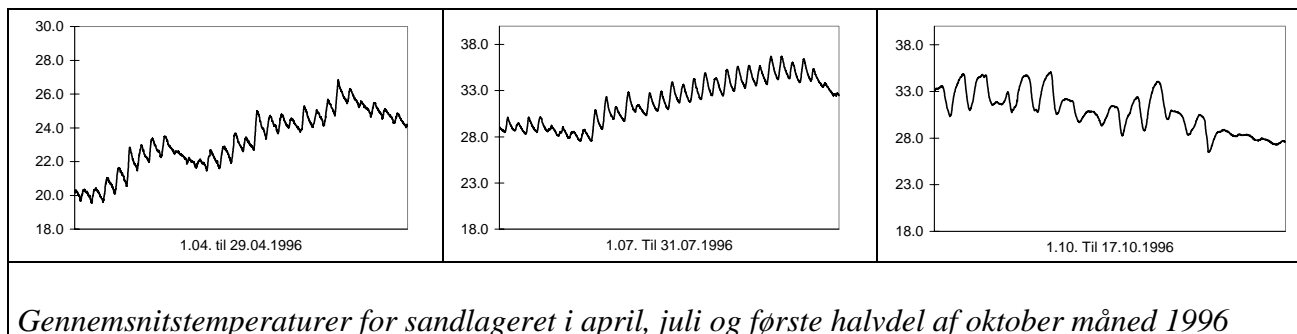


De gennemførte beregninger resulterede i en anbefaling af styringsstrategi nr. 2, da den gav 5-10% højere ydelse end strategi 1, som igen gav 5-10% højere ydelse end strategi 3.

Erfaringer

Der er i Danmark opført en del solvarmeanlæg med sandlager, men der er kun i beskedent omfang rapporteret uvildige undersøgelser af anlæggenes ydelser. Der er foretaget målinger på et system (DTU, 1996) med 18 m² solfangere og ca. 90 m³ sand i et 0,65 m tykt lag under en 135 m² stor bygning. Lageret er isoleret med 100 mm polystyren. Solfangerne kan levere varme til brugsvandsopvarmning, direkte rumopvarmning i gulvvarmekreds og til sandlageret og systemet er bygget med mulighed for aktivt at trække varme fra sandlageret til gulvvarmekredsen. Der gennemførtes i april til november 1996 målinger af temperaturen i sandlageret. De gennemsnitlige lagertemperaturer er optegnet for april, juli og oktober måned:

Status for aktiv varmelagring i mindre bygninger



I (DTU, 1996) blev det konkluderet, at

- anlægget virker
- de beregnede resultater for lager og jord giver realistiske resultater i forhold til de gennemførte målinger, hovedsageligt i form af temperaturmålinger
- der var ikke nævneværdig aktiv tilførsel af varme fra sandlager til gulvvarmekreds
- der synes muligheder for at forbedre anlæggets økonomi men dette kræver undersøgelser som endnu ikke er iværksat.

Udover de ovennævnte erfaringer er der indsamlet driftserfaringer fra anlæg opført i Danmark. 28 anlægsejere er blevet kontaktet og deraf har ca. 1/3 givet brugbar respons. Mange anlæg er relativt nye og ejerne har derfor ikke haft reelle driftserfaringer. Af de indkomne svar fremgår det, at ejerne generelt er tilfredse med deres anlæg, der har stort set ikke været driftstop eller udgifter til vedligeholdelse. Til gengæld ved kun få hvad anlægget reelt yder, ligesom ejerne ikke på forhånd har haft klare forventninger til ydelsen. Et centralt spørgsmål i forbindelse med sandlagre er overtemperaturproblemer om sommeren pga. varmeafgivelse fra lageret. Her viser svarene, at ca. halvdelen af brugerne ikke har oplevet problemer, medens den anden halvdel af brugerne har haft gener pga. lagerets varmeafgivelse om sommeren. Generne bliver reduceret ved kraftig ventilation.

Referencer omhandlende varmelagring i sand

DTU, 1993: Olesen, Ole: *Varmeteknisk vurdering af solvarmeanlæg med sandlager*, LfV-rapport 93-22, ISSN 0905-1511, Institut for Bygninger og Energi, DTU.

DTU, 1994: Møller, T.K.; Vieira, M.: *Solvarmeanlæg med Bygningsintegreret varmelager*, eksamensprojekt, Institut for Bygninger og Energi, DTU.

DTU, 1996: Heller, Alfred: *Undersøgelse af solvarme med bygningsintegreret sandlager*, IBE-rapport R-006, ISSN 1396-4011, Institut for Bygninger og Energi, DTU.

Dahlkild, J.J.: *Video vedrørende etablering af varmelager i sand m.v.* Under udgivelse. J.J. Dahlkild Langdal 5, 4300 Holbæk. Energistyrelsen j. nr. 51181/98-0069.

AKTIV VARMELAGRING I STEN

| <i>Oversigt Lagring Sten</i> | | <i>Bemærkning</i> | <i>Se mere</i> |
|------------------------------|--|--|--------------------|
| Varmedbærer | Luft | | Side 22 |
| Varmedfylde, lager | 1,2-1,4 MJ/m ³ K | Sten/luft blanding ~ ca. 1/3 af vands varmedfylde | |
| Temperaturspænd | 20-50°C | Svarende til sandlagre | Side 17 |
| Op/Afladning | Aktiv/Passiv - aktiv | Pas på bakterievækst i lager, specielt ved opblanding med indeluft | Side 22 Side 24 |
| Lagervolumen | 0,5 – 1m ³ /m ² solfanger | Svarende til sandlagre | Side 24 |
| Lagringsperiode | Døgn - uger | - | Side 23 |
| Dækningsgrader | 20-30% | Som sandlagre | Side 25 |
| Erfaringer | Delvis gode | Pas på bakterievækst | Side 24 + 25 |
| Integrationsvenlig? | Ja | | Side 24 |
| Andet | Komfort | Pas på overtemp. sommer. | Side 24 |
| | Bakterievækst | Undgå kondens i lageret | Side 24 |

Lagringsprincip

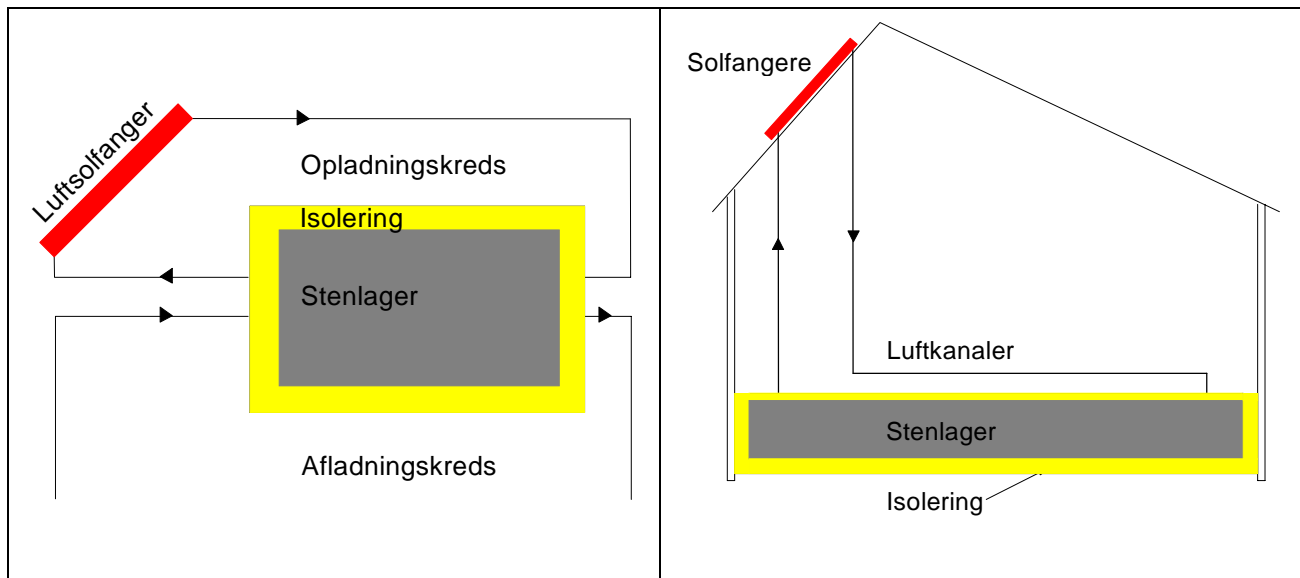
Luftbåren varme lagres i et velisoleret stenvolumen placeret f.eks. under bygningens terrændæk. Varmen overføres aktivt fra luft til lager ved at blæse den varme luft gennem stenvolumenet. Varmen kan afgives fra lageret til bygningen såvel passivt (ved varmetransport gennem lagerets isolering) som aktivt ved at trække luft gennem lageret. Afladning kan således ske ved f.eks. forvarmning af ventilationsluft til bygningen samt som varmeafgivelse til de øvrige omgivelser. Ud over at virke som aktivt/passivt lager, der tilfører bygningen varme, kan lageret reducere transmissionstabt mod jord hvis lageret er placeret under bygningen. Generelt kan velisolerede bygningers opvarmningsbehov gøres beskedent når solen skinner da en fornuftig passiv udnyttelse af solen giver et betydeligt energitilskud. Det betyder, at en effektiv passiv udnyttelse af solen til en vis grad overflødig gør en direkte anvendelse af aktiv solvarme til rumopvarmning når solen skinner, men stadig giver rum for lagret solvarme.

Termisk set fungerer et stenlager i høj grad som et sandlager, blot er det varmedbærende medie i et stenlager luft.

Eksempel på anlægsopbygning

I nedenstående figur er vist to eksempler på et solvarmeanlæg med varmelagring i et stenlager. Stenlageret er isoleret på alle sider. I eksemplet til venstre er lageret kraftigt isoleret på alle sider og skal primært aflades ved aktiv afladning. Et sådant lager kan i princip placeres frit, da lageret

primært skal aflades ved at blæse luft til f.eks. ventilation gennem lageret. Det anbefales dog, at lageret placeres et sted hvor varmetabet fra lageret kan nyttiggøres. Lageret til højre skal primært aflades passivt efter samme princip som sandlageret og skal derfor placeres under det område, der ønskes opvarmet via lagret solvarme.



Skitse af varmelagring af luftbåren solvarme i stenlager. Lageret til venstre er primært til aktiv afladning, lageret til højre er primært til passiv afladning.

Tidshorisont for varmelagring

Lagringsperioden afhænger af lagerets isoleringsgrad og udformning. Lange lagringstider (måneder) kan opnås ved meget kraftig isolering af lageret, men da en enkel passiv afladning af lageret derved forhindres/hæmmes er lageret mere velegnet til lagring over kortere tid (dage/uger). Lagerets primære funktionsperioder er i overgangsperioderne forår og efterår.

Lagerdesign

Generelt

Der er ikke foretaget præcise undersøgelser af den optimale udformning og størrelse af et stenlager. Erfaringerne med stenlagre er endnu mere begrænsede end erfaringerne med sandlagre. Sandlagre og stenlagre må dog forventes at have stort set samme termiske egenskaber med den forskel, at stenlageret er baseret på luftbåren varme. Svarende til sandlagre forventes et stenlager således at skulle udføres med et volumen som er i størrelsesordenen 10 gange større end et vandbaseret lager. Hvis lageret skal anvendes i forbindelse med aktiv afladning skal lageret udformes kompakt, dvs. ideelt som en terning, der er kraftigt isoleret på alle sider. Hvis lageret skal anvendes i forbindelse med passiv afladning bør lageret udformes så det har et relativt stort varmeoverførende areal til bygningen og isoleringen mellem lager og bygning kan være mindre end den øvrige isolering af lageret. Kombination af aktiv og passiv afladning af lageret er ligeledes en mulighed.

Stenstørrelsen skal af hensyn til lagerets termiske egenskaber være lille (giver et stort varmeoverførende areal mellem luft og stenlager). På den anden side skal stenene være så store, at

der ikke opstår u hensigtsmæssigt stort tryktab i lageret og samtidig skal stenstørrelserne sikre en jævn fordeling af den gennemstrømmende luft i lageret. Af hensyn til lagerets varmeakkumulerende evne bør stenene pakkes tæt. I (DTU, 1993) er anvendt vaskede strandsten i størrelsen 5-20 cm.

Mikrobiologiske forhold

Ved systemer hvor luft fra solvæg eller luftsolfangere trækkes ind i en bygning skal man være opmærksom på de mikrobiologiske forhold. Dette forhold bliver yderligere forstærket, hvis luften føres via et stenlager. De mikrobiologiske forhold er undersøgt i (COWI, 1997) hvor forholdene er undersøgt for et stenlager placeret i en isoleret krydsfinerkasse. Her konkluderes bl.a., at luften til stenlageret bør tilføres via filtre og, at det er nødvendigt at skifte filtre regelmæssigt (ca hvert halve år). Det er generelt vigtigt at undgå kondensdannelse i systemet, kortvarige kondensdannelser f.eks. om morgenen kan dog accepteres. Stenlagerets temperatur bør således ligge nogle grader (ca 5°C) højere end udetemperaturen. Ifølge (COWI, 1997) kan dette normalt lade sig gøre, men man skal specielt være opmærksom på:

- Perioder med driftstop
- Perioder med driftsfejl, hvor systemet kører ”baglæns”
- Lækager, hvor f.eks. regnvand kan trænge ind i systemet.

Herudover må der ikke indgå organiske materialer som træ i stenlageret, da målinger viste kraftig mikrobiologisk vækst på lagerets krydsfinerkasse. Der må heller ikke være væsentlige mængder af organiske rester på stenene, hvilket stiller store krav til rensningen af stenene.

Alt i alt vurderes det således ikke problemfrit at trække luft via stenlager ind i bygningen. Se også bemærkninger under ”erfaringer” nedenfor.

Lagerstørrelse

I (DTU, 1994 og DTU, 1995) er der beregningsmæssigt foretaget undersøgelser af forskellige parametres indflydelse på forventet ydelse for et solvarmeanlæg med et stenlager placeret under bygningen. Ved at beregne anlægsydelsen for et solvarmeanlæg med et stenlager under hele huset blev der ikke fundet nævneværdig reduktion af anlægsydelsen ved at ændre lagerdybden fra 90 til 30 cm. Dette er resultatet til trods for, at der i analyserne er forudsat luftsolfangere på over 100 m². Hvis der ikke er andre grunde til at have et dybere stenlager anbefales derfor et lagervolumen svarende til 30 cm dybde under hele bygningen.

Man skal være opmærksom på, at for et givent solfangerareal vil et lille lager opnå højere temperaturer om sommeren end et stor lager og dette kan medføre øget varmetilførsel fra lager til bygningen i sommerperioden og dermed øgede overtemperaturproblemer, se også under Aktiv varmelagring i sand.

Karakteristiske egenskaber ved denne lagringsmetode

Som nævnt ovenfor skal et stenlagers volumen være i størrelsesordenen 10 gange større end et vandlagers for at opnå samme ydelse. Til gengæld er stenlageret velegnet til integration i bygninger og pga. lagerets simple virkemåde forventes lageret at være driftsikkert og uden store vedligeholdelsesproblemer. Lageret kan anvendes ved såvel nybyggeri som ved renoveringsopgaver, hvor et eksisterende gulv alligevel skal opgraves og isoleres og den enkle teknik muliggør selv- eller medbyg.

Anlægsydelse/dækningsgrad

Ydelse og dækningsgrad afhænger i høj grad af solfangerareal og solfangereffektivitet, lagerudformning samt bygningens varmebehov. Et stort varmebehov kan give en relativ høj ydelse, men en lav dækningsgrad. Da et stenbaseret varmelager termisk set forventes at fungere stort set som et sandbaseret varmelager henvises til bemærkningerne i afsnittet om sandlagres Anlægsydelse/dækningsgrad.

Økonomi

Som for andre typer rumvarmeanlæg med varmelagre er økonomien bedst, hvis der er et rumvarmebehov overgangsperioderne og evt. i sommerperioden. De teoretiske analyser der ovenfor er refereret til har på beregningsmæssigt niveau sandsynliggjort, at energiprisen for et solvarmeanlæg med sandlager ligger på niveau med energiprisen for mere konventionelle rene brugsvandsanlæg – investeringen er større, men ydelsen forventes tilsvarende større. Om det samme gør sig gældende for solvarmeanlæg med stenlagre er ikke dokumenteret, men vurderes som sandsynligt.

Styring

Generelt bør styringen indrettes, så den producerede varme afsættes hvor der hurtigst er varmebehov – en lagring betyder altid tab. Herudover skal styringen sørge for, at temperaturen i lageret er høj nok til at undgå kondensdannelse, se også under ”mikrobiologisk aktivitet”.

Erfaringer

De publicerede erfaringer fra stenlagre i mindre bygninger er meget begrænsede. Som før nævnt er der beskrevet erfaringer mht. mikrobiologisk aktivitet i (COWI, 1997). I (COWI, 1996) er erfaringer med hensyn til lagerets termiske egenskaber beskrevet. Lageret er placeret i en etageejendom og har til formål at lagre varme på time-niveau i et lager, der er lille i forhold til beboelsesarealet. Det er konstateret at lageret termisk set virker efter hensigten, dvs. forsinker varmetilførslen til bygningen med op til ni timer.

I (DTU, 1994) er beskrevet undersøgelser på et 25 m² forsøgshus hvor luft til opvarmning af bygningen cirkulerer i et separat opvarmningssystem, der sørger for, at luften fra stenlageret ikke kommer i kontakt med rumluften. Herved undgås problemer med luftkvaliteten i opholdsrum, men systemet stiller til gengæld store krav til tætheden af det separate opvarmningssystem.

Referencer omhandlende varmelagring i sten

DTU, 1994: Isaksen, K.L.: *Solvægshus med integreret varmeanlæg. Målinger og beregninger*, Meddelelse nr. 263, ISSN 0905-1511, Institut for Bygninger og Energi, DTU

DTU, 1995: Fritzel, P.; Geneser, K.; Taudorf, A.; Vejen, N.K.: *Solhus med minimalt transmissions- og ventilationstab*, Meddelelse nr. 280, ISSN 1395 0266, Institut for Bygninger og Energi, DTU.

Status for aktiv varmelagring i mindre bygninger

COWI, 1996: Gramkow, L. m.fl.: *Solvægge til betonrenovering, Del 3. Måleresultater og anbefalinger. Slutrapport.* Energistyrelsen, j. nr. 1213/93-0016.

COWI, 1997: Hummelshøj, R.M. m.fl.: *Indeklimaforhold i forbindelse med ventilerede solvægge*, Energistyrelsen j. nr. 51181/95-0049.

AKTIV VARMELAGRING I BYGNINGSKONSTRUKTIONER

| <i>Oversigt Lagring i Bygningskonstruktioner</i> | | <i>Bemærkning</i> | <i>Se mere</i> |
|--|-----------------------|--------------------------------------|----------------|
| Varmebærer | Vand/luft | | Side 27 |
| Varmedfylde | 2 MJ/m ³ K | Data er for beton | |
| Temperaturspænd | 20-30°C | Højere max.temp. medfører diskomfort | Side 28 |
| Op/Afladning | Aktiv/Passiv | | Side 27 |
| Lagervolumen | - | Få data | |
| Lagringsperiode | Timer - døgn | | Side 28 |
| Dækningsgrader | ca 20% | Få data | Side 28 |
| Erfaringer | Gode | Få data | Side 29 |
| Integrationsvenlig? | Ja | Varme lagres direkte i konstruktion | |
| Andet | Komfort | Pas på høj temp. i konstr. | Side 29 |

Lagringsprincip

Ved denne lagringsmetode udføres bygningsdelene, så det varmetransporterende medium kan bevæge sig ind og ud af konstruktionerne. Dette varmelagringsprincip benytter sig hovedsagelig af aktiv varmetilførsel og passiv varmeafgivelse.

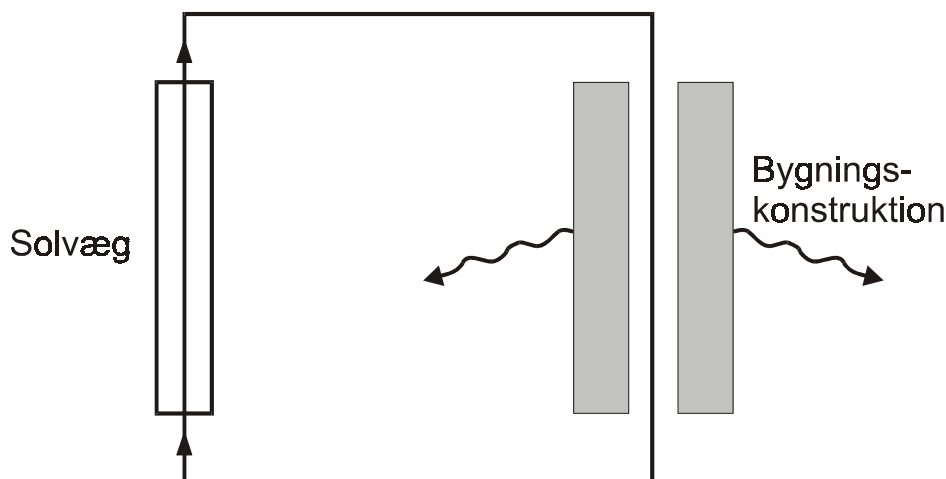
Varmen produceres af luft- eller væskesolfangere. Transportmediet overføres til lageret via pumpe, ventilator eller eventuelt naturligt drevet, hvor varmen afgives til bygningsdelen hovedsageligt konvektivt. Herfra afgives varmen passivt til indeklimaet.

Eksempler på anvendelse:

Gulvvarmeanlæg, luftsolvarme, hvor luften sendes igennem vægge eller gulve.

Anlægsudformning

I nedenstående figur er skematisk vist et eksempel på denne lagringsmetode. Der er vist luftbaseret system med lagring i en betonavæg. Varmelagre af denne type kan være meget individuelt udformet.



Eksempel på varmelagring direkte i en bygningskonstruktion (forenklet skitse)

Tidshorisont for varmelagring

For varmelagring i bygningskonstruktioner er kun korttidslagring muligt. Det vil sige perioder på timer eller få dage. Varmelagring over et tidsrum svarende til dag til nat er typisk. Lagring i længere perioder er ikke muligt, da lageret i så fald vil blive uacceptabelt varmt set fra et komfortmæssigt synspunkt.

Karakteristiske egenskaber ved denne lagringsmetode

Beton har en varmekapacitet pr. volumenenhed svarende til ca. 50% af vands varmekapacitet. Dette betyder, at der ikke kan lagres så meget varme i beton som i vand. Af komfortmæssige hensyn er det kun muligt at lagre varme ved en forholdsvis lav temperatur, så lagerets overfladetemperatur ikke overstiger ca. 30-35°C. Dette er også medvirkende til, at der kan lagres mindre mængder varme end i vand.

Da varme breder sig i beton ved varmeledning, vil der ikke være mulighed for nogen væsentlig temperaturlagdeling i lageret. På grund af betonens store masse vil lageret medføre en udjævning af temperatursvingninger i klimaet omkring lageret.

Især for luftbaserede systemer gælder, at lageret kan anvendes til forvarmning af ventilationsluft. Dette medfører, at selv varme ved temperaturer under rumtemperatur kan nyttiggøres som et tilskud til dækning af rumvarmebehovet.

Anlægsydelse/dækningsgrad

Systemets ydelse kan være svær at vurdere, idet kun varmetilførslen, men ikke varmeafgivelsen kan måles direkte. Især for lagre udført i de ydre bygningskonstruktioner, f.eks. gulv eller ydervægge vil der være et stort varmetab. Generelt gælder, at ydelsen pr. m² solfanger vil være størst for mindre anlæg.

På grund af den korte tidshorisont for varmelagringen, vil der kun være en væsentlig ydelse fra lageret, hvis der er et varmebehov inden for en kort tidsperiode efter varmen er tilført lageret.

I /1/ er der foretaget målinger på et anlæg med gulvvarme og meget tunge bygningskonstruktioner i 3 år, og de årlige dækningsgrader i dette tilfælde ligger på 23-29%.

Økonomi

Ved varmelagring i bygningskonstruktioner er det påkrævet, at bygningsdelene er udført med henblik på denne funktion. Varmelageret skal derfor udføres i forbindelse med opførelse af en ny bygning eller eventuelt i forbindelse med renovering eller ombygning. I disse tilfælde kan lageret udføres uden væsentlige meromkostninger i forhold til tilsvarende konstruktioner uden lager.

En af de ekstra omkostninger, der vil være nødvendige, er ekstra isolering af konstruktionen ud mod udeklimaet eller mod jord. Dette er nødvendigt, da varmetabet fra lageret ellers vil blive uacceptabelt stort i forhold til den energimængde, der kan tilføres lageret.

Styring

Varmeafgivelsen kan ikke styres direkte, da den foregår passivt ved konvektion og stråling til bygningen. I stedet må varmetilførslen til lageret styres. Dette kan give problemer, idet lagerets inertie bevirker, at temperaturen i lager og indeklima kun kan ændres meget langsomt. Desuden kan det give problemer, at varmeafgivelse fra et opvarmet lager ikke kan forhindres i perioder, hvor der ikke er et varmebehov.

Komfort

Varmelagring i bygningskonstruktioner bidrager pga. den store masse til at udjævne temperatursvingninger, hvilket giver et mere ensartet indeklima. Til gengæld bevirker de tunge konstruktioner, at det tager længere tid at ændre temperaturen, hvilket gør regulering af indeklimaet sværere.

Høje temperaturer i lageret vil give anledning til diskomfort, især hvis lageret er placeret i loft eller vægge. Også i gulve er der en komfortmæssig grænse for, hvor høj temperaturen må være. Generelt må overfladetemperaturer af komforthensyn ikke overstige ca. 30°C.

Hvis bygningsdelen skal være et lager for varme er det nødvendigt med overtemperaturer i forhold til det komfortmæssigt mest behagelige niveau. Denne lagertype egner sig derfor ikke på steder, hvor der er skrappe krav til komforten.

Hidtidige erfaringer

De hidtidige erfaringer angående dette varmelagringsprincip omhandler stort set kun gulvvarmesystemer (f.eks. /1/), mens der ikke er listet referencer, hvor der er foretaget målinger på varmelagre indbygget i vægge eller lofter. I øjeblikket foregår der undersøgelser af varmelagring i beton-elementer til f.eks. gulve eller vægge hos Institut for Bygninger og Energi, DTU og der foretages

også målinger af varmelagring i betonvægge på en gruppe ”økologiske” rækkehuse i Kolding. For disse målinger findes dog endnu ingen referencer. Der er også foretaget teoretiske betragtninger angående sådanne varmelagre (f.eks. /2/).

En af de meget vigtige faktorer for et effektivt lager er isoleringen omkring lageret. For lagre integreret i selve bygningen skal der isoleres ekstra ud mod udeklimaet i forhold til tilsvarende bygningsdele uden varmelager.

Det kan være vanskeligt at styre temperaturerne i lageret og derved i indeklimaet på grund af den store inert. Dette kan medføre komfortproblemer.

Referencer angående varmelagring i bygningskonstruktioner

/1/ Måling på rumvarmeanlæg, Sol til gulvvarme
Peter Christensen og Carsten Wesenberg
Nordvestjysk Folkecenter for Vedvarende Energi, 1990

Rapporten beskriver målinger på et solvarmeanlæg, der sammen med en storbrændekedel anvender bygningens tynde gulvkonstruktion som varmelager. Anlægget består af 16,6 m² solfangere, og der er desuden en 200 liter varmtvandsbeholder. Der er målt på anlægget i 3 år. Anlægsydelsen har ligget mellem 247 og 393 kWh/m², og dækningsgraden mellem 23 og 29%. Gulvvarmesystemet og husets øvrige tunge konstruktioner blev opført i forbindelse med en totalrenovering og der har ikke været væsentlige meromkostninger forbundet hermed.

/2/ Solvarmeanlæg med bygningsintegrerede varmelagre
Energiministeriets varmelagerprojekt, rapport nr. 21
Lars Olsen
Laboratoriet for Varveisolering, DTU, 1984

I denne rapport er en række forskellige systemløsninger til bygningsintegrerede varmelagre i forbindelse med solvarmeanlæg undersøgt teoretisk. Både systemer med passiv og aktiv varmeafgivelse undersøges. Desuden vurderes muligheden for at udnytte de bygningsintegrerede varmelagre til forvarmning af ventilationsluft.

/3/ 6 lavenergihuse i Hjortekær
Konstruktioner – arbejdsudførelse og erfaringer
Laboratoriet for Varveisolering, DTU, 1982

OM PROJEKTET STATUS FOR AKTIV VARMELAGRING I MINDRE BYGNINGER

Projektets formål

Projektets formål falder i tre dele:

- At skaffe overblik over anvendte lagringsmetoder ud fra gennemførte undersøgelser, primært i Danmark
- At samle drifterfaringer fra allerede opførte systemer
- At publicere resultaterne

Projektets finansiering

Projektet er finansieret af Energistyrelsens Udviklingsprogram for Vedvarende Energi (UVE), ENS j.nr. 51118/98-003.

Projektets deltagere

Trine Dalsgaard SolenergiCenteret (Teknologisk Institut)

Karsten Duer (projektleder) SolenergiCenteret (Institut for Bygninger og Energi, DTU)

Klaus Ellehauge SolenergiCenteret (Teknologisk Institut)

Palle Ladekarl, Aidt Miljø, Kongensbro, Aidt Mark, 8881 Thorsø.